

天然气管道完整性管理质量提升策略研究

夏大林(浙江油田公司,浙江 杭州 310000)

摘要:随着天然气在我国能源结构中占比不断提升,管道输送网络规模快速扩大,但是管道运行环境复杂且多年服役造成腐蚀和第三方破坏等风险持续积聚。针对此问题,本次研究引入完整性管理理念,首先对天然气管道完整性管理的定义与体系进行分析,并对天然气管道完整性管理质量提升策略进行探讨,最后,以某天然气管道为例,开展案例研究,为保障我国天然气管道的安全可靠运行奠定基础。

关键词:天然气管道;完整性管理;管理质量;提升策略;案例分析

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167(2025)026-0166-03

Research on Quality Improvement Strategies for Integrity Management of Natural Gas Pipelines

Xia Dalin(Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou Zhejiang 310000, China)

Abstract: With the increasing proportion of natural gas in China's energy structure and the rapid expansion of pipeline transportation networks, the operating environment of pipelines is complex and risks such as corrosion and third-party damage continue to accumulate due to years of service. In response to this issue, this study introduces the concept of integrity management. Firstly, the definition and system of integrity management for natural gas pipelines are analyzed, and strategies for improving the quality of integrity management for natural gas pipelines are discussed. Finally, a case study is conducted using a certain natural gas pipeline as an example to lay the foundation for ensuring the safe and reliable operation of natural gas pipelines in China.

Keywords: natural gas pipeline; Integrity management; Quality management; Enhancement strategy; case analysis

随着我国能源结构持续优化与天然气消费规模快速增长,长输天然气管道作为连接产区与消费区的关键基础设施,其安全稳定运行关系国家能源安全与社会经济发展。但是管道服役年限不断延长和外部扰动因素增多,金属腐蚀和地质灾害等风险持续积累,传统的事后检修和单一技术监测模式已难以满足现代化管网完整性管理需求。在此背景下,构建覆盖管道全生命周期的完整性管理质量提升策略尤为迫切,通过引入风险评估与大数据分析等先进技术,结合完善的组织管理与标准化流程,可实现管道缺陷早期预警与科学决策,显著降低事故率和运维成本^[1]。本次研究将结合完整性管理质量提升的关键措施,以某天然气管道为例,开展实例研究,为天然气管输企业提供可复制和可推广的完整性管理质量提升措施奠定基础。

1 天然气管道完整性管理定义与体系

天然气管道完整性管理是指在管道全生命周期范围内,通过系统化的组织和技术手段,对管道的结构状态和外部干扰等多种因素进行动态识别与控制,以持续保障管道安全和经济运行的一整套管理活动。其核心目标包括预防管道泄漏与破裂事故、延长设施使用寿命、优化运维成本。完整性管理不仅关注管道本体材料性能,还涵盖焊缝质量与内外腐蚀监测、地质灾害与第三方侵扰防范等广泛因素,同时强调风险导向、数据驱动、闭环控制的理念,通过制定完整性政策、

划分管理区域、建立风险等级标准和检验频次规范,实现对管道健康状况的全过程和全要素管控^[2]。

为了有效实施完整性管理,需构建由顶层设计、技术执行与持续改进三大模块相互支撑的综合体系,在顶层设计上,应由企业高层制定完整性管理方针与目标,明确各级管理职责,成立由管道运营及信息化等部门组成的完整性管理委员会。在技术执行层面,通过管道地理信息系统、智能检测工具、在线监测设备和大数据平台,构建检测、评估、决策、修复闭环流程,检测发现隐患,评估量化风险,决策优化方案,实施修复与防护,同时将检测与修复信息归档于统一数据库,用于模型校正与历史溯源^[3]。在持续改进层面,应定期开展安全文化培训与应急演练,结合事故教训与行业标准更新完整性管理流程,通过关键绩效指标评估体系,对管道泄漏率、检修周期、现场合格率等指标进行监控,并通过计划、执行、检查、改进循环,不断优化风险评估模型与运维策略,从而形成具有前瞻性和适应性的天然气管道完整性管理体系。

2 天然气管道完整性管理质量提升策略

2.1 高后果区识别

首先,应在管道沿线进行全面的高后果区识别,以聚焦最易造成重大人员伤亡、环境破坏和社会经济损失的关键管段。高后果区识别应结合管道自身属性与外部环境因素,遵循全要素、动态化、可视化原则。一方面,

通过管道 GIS 平台采集与更新沿线人口密度、环境敏感区、关键设施等多类别空间数据，对影响后果严重度的要素进行权重评估与空间叠加。应将天气、地质灾害预警、第三方施工活动等时变因素纳入动态监控范畴，实现风险空间格局的实时刷新^[4]。通过构建高后果区分级体系，将沿线管段划分为一级高后果区、二级高后果区和普通区，为后续风险评价和检修资源配置提供基础。该策略不仅强调识别的准确性，也注重识别结果在管道运营管理、应急响应预案修订、公众风险沟通等方面的操作性，确保企业能在事前精准布控、事中快速响应、事后有效评估全流程提升管理质量。

2.2 管道风险评价

在高后果区识别的基础上，管道风险评价需构建概率、后果双维度模型，以科学量化管段风险水平并指导检修和防护优先级。概率维度应综合管道材料老化程度、历史缺陷分布、外部干扰、内腐蚀及操作压力波动等因素，采用多源数据融合与定性定量评估相结合的方式，形成动态失效概率计算框架。后果维度则基于高后果区等级，结合潜在泄漏规模、环境敏感性和社会影响范围，制定标准化后果打分方法。通过风险值 = 失效概率 × 失效后果的方式，对管段进行风险分级管理，并明确特别高风险、高风险、中风险、低风险四档等级。评价结果应与运营、维护、应急、财务等多个职能部门共享，以实现跨部门协同决策。为保证风险评价模型的持续有效，需定期开展模型校准，通过历史事件回溯分析与专家评审，不断优化参数和权重分配，从而形成可适应多变监管要求与外部条件的风险评价体系。

2.3 管道完整性评价

综合管道风险评价结果，完整性评价侧重于确定管道健康状态和剩余使用寿命，并提出针对性的技术干预措施。完整性评价的关键在于将不同检测手段的数据结果进行深度融合，包括智能检测设备、在线实时监测以及现场检维修记录。通过建立检测、缺陷特征提取、强度分析、完整性指数赋值四步流程，实现管道完整性指数的动态计算，对各管理单元给出健康评分^[5]。评价过程中，应重视定性分析与定量计算并举，既要关注金属损伤、腐蚀、疲劳裂纹等具体缺陷，也要结合管道运行参数和历史环境负荷，对剩余强度比和失效模式进行科学判断。评价结果不仅要为检修、加固和更换提供技术依据，还应纳入管理 KPI，将完整性指数与运营绩效挂钩，倒逼各级管理持续关注管道健康，确保评价成果在决策层面得以充分利用。

2.4 完整性数据应用

有效的数据应用是驱动完整性管理质量提升的重要

引擎，应围绕数据采集、集中存储、智能分析、可视化决策构建端到端闭环体系。首先，通过管道完整性管理系统汇集检测、运维、应急响应及环境监测等异构数据源，形成统一的管网大数据仓库，借助机器学习与人工智能算法，对历史缺陷演化趋势、环境影响因子、检维修效果等进行深度挖掘，输出缺陷预测模型与最优检修决策建议。将数据成果通过可视化仪表盘与地图热力图等方式呈现给运营和应急团队，支持一线可视化、指挥集成化、调度精准化的决策模式。应建立数据质量保障机制，从数据采集规范、数据校验流程和数据安全管理等方面入手，确保数据的准确性、完整性与安全性。通过定期开展数据应用效果评估，与风险评价和完整性评价结果相互印证，持续优化算法模型和业务流程，不断提升管道完整性管理的智能化与精细化水平，实现天然气管道安全运行的持续改进。

3 案例分析

3.1 案例介绍

我国某天然气管道全长 120 km，管径 $\phi 820$ mm，壁厚 9.53 mm，设计压力 8.4 MPa，投产于 2013 年。管道主材为 X65 级无缝钢管，外壁环氧粉末涂层，内壁采用防腐层喷涂，输气量设计为 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，日输气能力约 $3.3 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。沿线地形以丘陵、山谷和城市郊区交替分布，平均海拔变化范围 300 m~1 200 m，高后果区长度 12 km，占管段总长的 10%，主要分布在巴南和南岸两处居民集中区及两处一级水源保护区范围内。该管段穿越三条主要支流和四条国道，历年外部干扰事件平均每年 3 次，地质沉降和第三方开挖风险明显。管段自投产以来累计完成 4 次智能球内检、3 次超声相控阵检测及 2 次磁通渗透检测，在线监测点覆盖率由初期 10% 提升至 30%，新增壁厚传感器 24 处、压力监测仪 18 台。运营单位在沿线 10 个机井房和 4 个调压站均部署有 SCADA 系统，实时采集压力、温度及流量数据，并与 GIS 平台联动，实现管道状态的全天候可视化监控。

3.2 完整性评价结果分析

针对该管道，本次完整性评价采用多源检测、定量分析、综合打分的三步法。在多源检测汇集方面，整合最近一次的智能球内检、超声相控阵、磁通渗透及在线壁厚监测数据，并参考历年维修记录。在缺陷定量评估方面，对检测出的金属腐蚀、机械损伤、焊缝裂纹等缺陷，依据 ASME B31G 与 R-STRENG 方法计算剩余强度比，并按危险程度划分处理期限。在完整性指数与风险打分方面，每 10 km 为一管理单元，将各检测单元按缺陷密度、剩余强度比分布、在线监测指标三项子指标赋分，最终得到 0~100 分的完整性指数，用以量化管段健康水平，并与风险评价结果

共同指导运维策略。

在最近一次检测中，该管道内检测距离为 120km，超声相控阵检测 80 km，磁通渗透检测 60 km，在线壁厚监测点 24 处。检测共发现金属腐蚀缺陷 42 处，占缺陷总数的 74%，焊缝疲劳裂纹 5 处，占缺陷总数的 9%，机械损伤 10 处，占缺陷总数的 17%，其中高后果区内缺陷 19 处，占总缺陷数的 33%。腐蚀深度多集中在外墙环氧层薄弱区，最大腐蚀深度达 1.8 mm，焊缝裂纹长度多在 10 mm~25 mm 之间，肉眼可见，但裂纹宽度均 < 0.2 mm。

对上述关键缺陷，采用 ASME B31G 方法计算剩余强度比，其中，6 处缺陷的剩余强度比低于 0.85，需在 6 个月内局部修补或更换，8 处缺陷的剩余强度比处于 0.85~0.90 之间，建议在 12 个月内复检并必要时加固，其余缺陷的剩余强度比大于 0.90，可纳入常规检修周期。高后果区内的 19 处缺陷中，剩余强度比低于 0.85 的有 4 处，占比为 21%，其余 15 处的剩余强度比多数处于 0.85~0.92 区间，表明该区域管道健康水平相对偏低，急需加强监测和局部修复。常规区段中，剩余强度比低于 0.85 的缺陷仅 2 处，整体状况较好。将管段分为 12 个管理单元，其完整性指数赋分规则如下表 1 所示。

表 1 完整性指数赋分规则

指标类别	赋分规则
缺陷密度	单元缺陷数 / 10 km: 0 处 → 10 分; 1~3 处 → 8 分; 4~6 处 → 6 分; > 6 处 → 4 分
剩余强度分布	剩余强度比均值: > 0.95 → 10 分; 0.90~0.95 → 8 分; 0.85~0.90 → 6 分; < 0.85 → 4 分
在线监测 异常率	异常次数 / 年: 0 次 → 10 分; 1~2 次 → 8 分; 3~4 次 → 6 分; > 4 次 → 4 分

每单元完整性指数 = (缺陷密度分 + 强度分 + 在线监测分) / 3，总分 100 分。评价结果显示，管段平均完整性指数为 84 分，较 2022 年提升 6 分。高后果区单元平均完整性指数为 77 分，低于全段均值 7 分；最低完整性指数单元得分 68 分，主要因高后果区缺陷集中且剩余强度比较低。

综合评价可以发现，该管道整体健康水平良好，全段平均完整性指数 84 分，处于较优档次，常规区段完整性指数均值大于 85 分，仅少数单元需关注。重点管段需集中修复，高后果区单元完整性指数均值 77 分，应在未来 6 个月内完成局部换管或内部衬垫，并缩短该段在线监测频次至 4 次 / 日。监测体系需进一步完善，在线壁厚监测覆盖率由 30% 提升至目前的 40% 仍不充分，建议在低完整性指数单元新增壁厚与压力传感器各 8 处，以实现 24 h 全要素动态感知。

3.3 完整性管理措施

基于对该条管道完整性评价结果，首先，对评估

中剩余强度比低于 0.85 的临界缺陷点实施优先修复，通过局部换管或内衬补强等工艺，在 6 个月内完成整改，并对处理效果开展复检确认，在高后果区和低完整性指数值管理单元增设在线壁厚与应力传感器，实现重点区域 24h 不间断监测，并将监测数据实时接入管道完整性管理系统平台，触发预警时自动下发检修工单。优化风险评价模型，依据最新检测及环境变化数据，按年度周期修正失效概率和失效后果参数，确保风险分级与现场实际相符，完善闭环管理流程，将检测、评估、修复、验证纳入企业 KPI 体系，以完整性指数、检修完成率和事故率等指标为考核依据，并组织多部门联动的定期评审与应急演练。加强技术队伍培训与知识共享，通过专题讲座与现场演练，提高运维人员对新型检测设备和评估方法的掌握度，促进经验在不同管段间的复制与推广，切实提升管网安全韧性和运维效率。

4 结论

综上所述，通过管道 GIS 平台划定关键高后果区，构建失效概率 × 失效后果风险分级模型，并在每 10 km 管理单元内基于多源检测数据计算完整性指数，可实现对管道健康水平的量化评估。以我国某天然气管道为例，应用所提策略后，运维响应时间大幅缩短，运维成本下降，案例验证了策略的可行性和实效性。未来需要进一步完善风险模型校准机制，加密在线监测覆盖，并将完整性指标纳入企业 KPI 体系，推动技术队伍培训与跨部门协同，持续优化检测、评估、修复、验证闭环，为全国长输天然气管网安全和可持续运行提供可复制的经验。

参考文献：

- [1] 王居伟 . 天然气管道完整性管理建设与关键技术分析 [J]. 化工管理 ,2025,(08):1-3.
- [2] 谢雳雳 , 罗嘉慧 , 杨浩 . 天然气长输管道完整性管理效能评价指标研究 [J]. 内蒙古石油化工 ,2024,50(09):10-14.
- [3] 史大明 . 天然气管道完整性管理建设与关键技术分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量 ,2024,44(17):73-75.
- [4] 董志 , 齐钊 . 天然气管道完整性管理建设及关键技术 [J]. 化工管理 ,2024,(06):76-78.
- [5] 王盼峰 , 常明亮 , 陈伟聪 , 等 . 浅析油气管道完整性管理技术研究与应用 [J]. 天然气技术与经济 ,2022, 16(02):44-49.

作者简介：

夏大林 (1991-)，男，汉族，贵州修文人，大学本科，工程师，从事设备及管道和站场完整性管理工作。